

УДК 631.6:626.86(476)

## **ЭВАПОТРАНСПИРАЦИЯ НА РАЗУПЛОТНЁННЫХ МИНЕ- РАЛЬНЫХ ОСУШАЕМЫХ ЗЕМЛЯХ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ**

*А.В. КОПЫТОВСКИХ*

*Ключевые слова: минеральные почвы, глубокое рыхление, эвапотранспирация.*

*Keywords: mineral soil, deep tillage, evapotranspiration.*

*Приведены результаты исследований испаряемости в условиях Белорусского Поозерья при глубоком рыхлении минеральных осушаемых почв, позволившие уточнить расчётные зависимости, необходимые при определении режимов увлажнения сельскохозяйственных культур.*

*Results of evaporation researches in the Belarusian Lakeland with deep tilled drained mineral soil, allowed to clarify the calculated dependencies required to determine the irrigation regime of agricultural crops.*

В настоящее время вопросы расчёта испаряемости (максимальной эвапотранспирации) для большинства сельскохозяйственных культур достаточно полно изучены и отражены в работах А.М. и С.М. Алпатьевых [1], А.И. Будаговского [2], М.Г. Голченко [3], А.И. Михальцевича [4], А.П. Лихачевича [5], В.Ф. Шебеко [6] и других. Известно, что основными факторами, определяющими испаряемость, являются метеорологические условия, влажность почвы, биологические осо-

---

**Копытовских Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент (УО «Полесский государственный университет», Белоруссия).**

бенности культур. Тип почвы несущественно влияет на испаряемость. Однако физическое состояние испаряющей поверхности, определяющее тепло- и влагообмен между почвой и воздухом в приземных слоях, может оказывать определённое влияние на эту величину. В частности, установлено, что глубокое рыхление почвы приводит к росту испарения. Очевидно, это обусловлено существенным увеличением пористости (в среднем на 20...30 %) и, как следствие, аэрации почвы (в среднем на 60...70 %), с одной стороны, и более интенсивной транспирацией, с другой, в связи с улучшением водно-физических свойств почвы и усилением роста растений [7].

Тем не менее, до настоящего времени детальных исследований в этом направлении не проводилось, хотя игнорирование в расчётах фактора глубокого рыхления почвенного профиля неизбежно приводило к погрешностям в определении водопотребления при проектировании режимов орошения и увлажнения. В связи с этим была поставлена задача – оценить влияние приёмов глубокого рыхления на испарение.

Исследования проводились в 1996 – 2001 гг. на землях Витебского экспериментального хозяйства, расположенного в Сенненском районе Витебской области, на дерново-подзолистых почвах в диапазоне гранулометрического состава от связных супесей до

тяжёлых суглинков при выращивании различных сельскохозяйственных культур в условиях высоко-го агрофона. На опытных участках в весенний период выполнялось сплошное глубокое рыхление рыхлителем РЩ-80 (на глубину 60 см). Измерения проводили с помощью испарителей ГГИ-500 по стандартной методике [6]. В качестве контрольного был принят вариант без глубокого рыхления. При обработке данных измерений учитывалось, что репрезентативным фактором, оказывающим влияние на испарение, является дефицит влажности воздуха, при использовании которого коэффициент корреляции с испаряемостью достигает 0,88...0,90 [3].

При разработке зависимостей, отражающих связь между исследуемыми факторами, важное значение имеет правильный выбор математической модели. Наиболее простая – линейная связь – предложена А.М. и С.М. Алпатевыми:

$$E_{ij} = K_{ij} d_{ij} n_{ij}, \quad (1)$$

где  $E_{ij}$  – максимальная эвапотранспирация культуры;  $K_{ij}$  – биоклиматический коэффициент;  $d_{ij}$  – дефицит влажности воздуха;  $n_{ij}$  – продолжительность периода (индексы  $ij$  означают  $i$ -й период в  $j$ -м году).

К недостаткам модели следует отнести невысокую точность, обусловленную простотой используемой зависимости.

В порядке продолжения данных исследований А.И. Михальцевичем была показана значимость использования в линейном уравнении свободного члена, с учётом которого модель приобретает следующий вид:

$$E_{ij} = K_{ij} n_{ij} (a d_{ij} + b), \quad (2)$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности;  $b$  – свободный член уравнения.

Практическое использование уравнения (2) позволило повысить точность расчётов до приемлемого уровня. Однако более детальные исследования показали большую правомерность применения при определении эвапотранспирации степенных зависимостей, что подтвержда-

Таблица 2. Значения параметров  $b$ ,  $c$ ,  $b_r$  и  $c_r$

Сельскохозяйственная культура	$b$	$c$	$b_r$	$c_r$
Озимая рожь	1,94	0,61	1,13	0,97
Овёс	1,64	0,71	1,15	0,96
Клевер 1-го года	2,08	0,57	1,14	0,96
Клевер 2-го года	2,19	0,54	1,14	0,94
Луг	2,35	0,50	1,09	0,96
Кормовая свекла	2,64	0,43	1,10	0,98
Кукуруза	2,51	0,46	1,11	0,96

ется соответствующими теоретическими разработками [5, 8].

При создании теоретической базы А.П. Лихацевичем и Е.А. Стельмахом использовано положение О.Д. Сиротенко об инерционности реакций живых, в том числе растительных организмов на изменение условий внешней среды. В качестве прообраза искомой была предложена следующая зависимость:

$$dK/dM = -\alpha K/M, \quad (3)$$

где  $M$  – любая репрезентативная характеристика внешней среды, например дефицит влажности воздуха;  $\alpha$  – параметр пропорциональности.

С учётом (3) получено следующее выражение максимальной эвапотранспирации:

$$E_{ij} = k_{di} (d_{cp})^{\alpha} d_{ij}^{(1-\alpha)} n_{ij}, \quad (4)$$

в котором  $k_{di}$  – биологический коэффициент для  $i$ -го периода, ориентированный на осреднённые условия среды и постоянный по годам;  $d_{cp}$  – осреднённый дефицит влажности воздуха за весь период вегетации. С учётом обозначений

$$(d_{cp})^{\alpha} = b, \quad 1 - \alpha = C_0,$$

получаем

$$E_{ij} = k_{di} b d_{ij}^{C_0} n_{ij}. \quad (5)$$

Принимая для упрощения в качестве обобщённого множителя уравнения (5)  $b_0 = k_{di} b$  и в качестве расчётного периода заданный единичный интервал времени, то есть  $n_{ij} = 1$ , получаем степенную зависимость испаряемости от дефицита влажности воздуха:

$$E = b_0 d^{C_0}. \quad (6)$$

В таблице 1 приведены показатели  $b_0$  и  $C_0$ , коэффициент корреляции  $R$  и стандартная ошибка  $\Delta E$  уравнения (6), полученные в результате регрессионного анализа данных полевых экспериментов. Сопоставление коэффициентов регрессии по вариантам свидетельствует о влиянии глубокого рыхления на их численные значения, а именно: параметр  $b_0$  на почвах, где

Таблица 1. Эмпирические коэффициенты для определения максимальной эвапотранспирации в условиях Поозерья

Сельскохозяйственная культура	Вариант	$b_0$	$C_0$	$R$	Стандартная ошибка $\Delta E$
Озимая рожь	рыхление	1,42	0,59	0,96	0,14
	контроль	1,26	0,61	0,95	0,16
Овёс	рыхление	1,42	0,68	0,92	0,28
	контроль	1,23	0,71	0,90	0,30
Клевер 1-го года	рыхление	1,62	0,55	0,95	0,16
	контроль	1,42	0,57	0,96	0,15
Клевер 2-го года	рыхление	1,65	0,51	0,94	0,17
	контроль	1,45	0,54	0,94	0,16
Луг	рыхление	1,54	0,48	0,96	0,09
	контроль	1,41	0,50	0,97	0,07
Кормовая свёкла	рыхление	1,57	0,42	0,92	0,25
	контроль	1,44	0,43	0,92	0,23
Кукуруза	рыхление	1,69	0,44	0,94	0,16
	контроль	1,52	0,46	0,93	0,17

применялся данный агромелиоративный приём, увеличивается, параметр  $C_0$  уменьшается. Это обстоятельство позволяет выделить в них составляющую, связанную с изменением физических свойств почвенного профиля в результате рыхления. Так, параметры  $b_0$  и  $C_0$  можно представить в виде:

$$C_0 = c, c, b_0 = b, b k_{d_0} \quad (7)$$

где  $c$  – показатель степени в уравнении (6) при отсутствии глубокого рыхления;  $c_r$  и  $b_r$  – корректирующие коэффициенты при наличии рыхления почвенного профиля, принимаемые равными 1 при отсутствии рыхления.

Поскольку

$$c = 1 - \ln b / \ln d_{cp} \quad (8)$$

а  $d_{cp} = 5,5$  мб (по статистическим данным Сенненской метеорологической станции), с учётом (8) получим:

$$c = 1 - 0,58 \ln b \quad (9)$$

Анализ этого уравнения показывает, что в диапазоне действующих значений параметра  $b$  вполне допустима линейная аппроксимация с коэффициентом корреляции  $R = 0,98$ ; тогда

$$c = 1,13 - 0,27b \quad (10)$$

Рассчитанные по данным экспериментов значения параметров  $b$ ,  $c$ ,  $b_r$  и  $c_r$  приведены в таблице 2.

С учётом уравнений (5), (7) и (9) можно записать:

$$E = b, b k_d d^{(1 - 0,58 \ln b)} n \quad (11)$$

Тогда расчётная зависимость для определения максимальной эвапотранспирации при глубоком рыхлении приобретает следующий вид:

$$E_r = b, d_{cp}^{(1 - c_r c)} k_d d^{c_r c} n \quad (12)$$

Формула (12) по структуре соответствует аналогичной зависимости, полученной А.П. Лихацевичем и Е.А. Стельмахом [5], но дополнительно учитывает изменение физических свойств почвенного профиля при проведении сплошного глубокого рыхления. Поэтому формула позволяет повысить надёжность водобалансовых расчётов при проектировании режимов увлажнения сельскохозяйственных культур, в том числе и их водопотребления.

В таблице 3 приведены результаты оценки точности определения испаряемости в условиях Белорусского Поозерья с использованием полученной модели. Из таблицы следует, что относительная ошибка расчётных значений  $E$ , вычисленных по уравнениям (11) и (12), в среднем не превышает 3,8 %.

Таблица 3. Эвапотранспирация сельскохозяйственных культур на осушаемых минеральных почвах при глубоком рыхлении и без рыхления

Культура	Месяц	Вариант	Среднесуточный дефицит влажности воздуха, $d$ мб	Испаряемость за декаду, $E$ мм		Относительная ошибка, %
				вычисленная	измеренная	
Озимая рожь	июль	рыхление	4,4	34,03	33,95	– 0,25
		контроль		31,11	32,41	4,18
Овёс	август	рыхление	3,3	31,98	33,56	4,94
		контроль		28,71	27,56	– 4,01
Клевер 1-го года	то же	рыхление	5,0	39,26	38,10	– 2,95
		контроль		35,54	36,24	1,97
Клевер 2-го года	июнь	рыхление	6,6	43,20	40,79	– 5,57
		контроль		40,17	40,54	0,92
Кормовая свёкла	то же	рыхление	7,6	36,80	36,12	– 1,85
		контроль		34,44	33,54	– 2,62
Кукуруза	– « –	рыхление	7,6	41,25	43,82	6,23
		контроль		38,64	38,12	– 1,34

### Выводы

1. Глубокое рыхление минеральных осушаемых почв способствует более интенсивной испаряемости, значения которой определяются видом возделываемых сельскохозяйственных культур.

2. Исследованиями эвапотранспирации в условиях Белорусского Поозерья установлены эмпирические коэффициенты для расчёта максимальной испаряемости, связанные с изменением физических свойств почвенного профиля в результате глубокого рыхления.

### ЛИТЕРАТУРА

- Алпатьев А.М. Влагооборот культурных растений. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 258 с.
- Будаговский А.И. Испарение почвенной влаги. – М.: Наука, 1964. – 242 с.
- Голченко М.Г. Влагообеспеченность и орошение земель в Белоруссии. – Минск: Ураджай, 1976. – 190 с.
- Михальцевич А.И. О совершенствовании биоклиматического метода расчёта испарения с орошаемых полей // Мелиорация переувлажнённых земель. Сб. научн. работ БелНИИМиВХ. – Т. XVII. – 1979. – С. 41 – 65.
- Лихацевич А.П., Стельмах Е.А. Совершенствование методики расчёта водопотребления сельскохозяйственных культур // Мелиорация переувлажнённых земель. Сб. научн. работ БелНИИМил. – Т. XLIII. – 1996. – С. 91 – 98.
- Методические указания по гидрологическим расчётам при проектировании осушительно-увлажнительных систем Полесья / Сост. Шебеко В.Ф. – Минск, 1972. – 351 с.

7. Копытовских А.В. Оптимизация систем обработки почвы при структурной мелиорации минеральных земель: Монография. – Минск: Учебно-методический центр Минсельхозпрода, 2004. – 227 с.

8. Сиротенко О.Д. На стыке наук // Человек и стихия. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – С. 48 – 50.

## МЕЛИОРАЦИЯ И ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Редакция журнала "Мелиорация и водное хозяйство" (Москва)

Предыдущее название: [Гидротехника и мелиорация](#) (с 1949 по 1987 год)

Номер: 4 Год: 2011

Название статьи	Страницы	Цит.
<b>МЕЛИОРАЦИЯ: ПРОБЛЕМЫ ТРЕБУЮТ РЕШЕНИЯ</b>		
 <a href="#">МЕЛИОРАЦИЯ ЗЕМЕЛЬ В ПОВОЛЖЬЕ: ПРИЧИНЫ НЕУДАЧ И ПЕРСПЕКТИВЫ</a>  Щербаков В.А., Абдразаков Ф.К.	2-7	<a href="#">11</a>
 <a href="#">КУРСКИЕ МЕЛИОРАТИВНЫЕ АНОМАЛИИ</a>  Урванцев Г.С.	7-11	0
 <a href="#">ХОЗЯЙСТВЕННО-МЕЛИОРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕСПУБЛИКИ КАЛМЫКИИ</a>  Дедова Э.Б., Бородычёв В.В., Шуравилин А.В.	11-13	<a href="#">28</a>
<b>МЕЛИОРАТИВНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ</b>		
 <a href="#">ГРЕБНИСТАЯ ОБРАБОТКА ОСУШАЕМЫХ ПОЧВ ПОД ЗЕРНОФУРАЖНЫЕ КУЛЬТУРЫ</a>  Митрофанов Ю.И.	14-17	<a href="#">3</a>
 <a href="#">ОПТИМИЗАЦИЯ ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ВОДНОГО РЕЖИМА ЛУГОВО-КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ, НАРУШЕННЫХ ПЛУЖНОЙ ПОДОШВОЙ</a>  Гасанов Г.Н., Гаджиев К.М., Бексултанов А.А.	17-19	<a href="#">1</a>
 <a href="#">ЭВАПОТРАНСПИРАЦИЯ НА РАЗУПЛОТНЁННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ОСУШАЕМЫХ ЗЕМЛЯХ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ</a>  Копытовских А.В.	19-21	0
 <a href="#">ПРОМЫВКА ЗАСОЛЁННЫХ ПОЧВ НА ФОНЕ ПРИМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ МЕЛИОРАНТОВ</a>  Искендеров М.Я.О.	21-23	0
<b>ИНФОРМАЦИЯ</b>		
 <a href="#">М.Г. РУБИНУ - 85 ЛЕТ</a>	23	0



## МЕЛИОРАЦИЯ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА



### МОНИТОРИНГ ВОДНОГО РЕЖИМА СЕЛЬХОЗУГОДИЙ, ПРИЛЕГАЮЩИХ К ОСУШИТЕЛЬНЫМ СИСТЕМАМ

24-28 [1](#)



Григоров М.С., Жибуртович К.К., Курчевский С.М.



### ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МЕЛИОРИРУЕМЫХ ПОЙМ

28-30 0

Касьянов А.Е.



### ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МОНИТОРИНГА ТЕРРИТОРИЙ С ОБЪЕКТАМИ МЕЛИОРАЦИИ

30-32 0



Арефьев Н.В., Мартовский В.А.



### КРИТЕРИИ И ИНДИКАТОРЫ ОЦЕНКИ РЕКРЕАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ГОРНЫХ ЛЕСОВ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

32-35 [7](#)



Ивонин В.М., Самсонов С.Д.

## ИНФОРМАЦИЯ



### Ю.Н. НИКОЛЬСКОМУ - 70 ЛЕТ

35 0



## ОРОШЕНИЕ



### ПОЛНОТА И ДОСТОВЕРНОСТЬ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОЛИВА ДОЖДЕВАНИЕМ

36-38 [10](#)



Городничев В.И.



### КОЭФФИЦИЕНТ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ КАК КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА РАННЕГО КАРТОФЕЛЯ

38-40 [11](#)



Мелихов В.В., Новиков А.А.



### УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ УРОЖАЯ РАССАДНОГО ЛУКА

40-42 [2](#)



Дубенок Н.Н., Выборнов В.В., Богданенко М.П., Стрижакова Е.А.

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ОХРАНА







### ПРАВО НА ВОДУ - КАЖДОМУ!

42-45 0



Омельяненко В.А.

	<a href="#"><u>КОНФЕРЕНЦИЯ О ВОДЕ И ДЕНЬ ВОДЫ В АШХАБАДЕ</u></a>		
	<i>Маслов Б.С.</i>	45-47	0
	<a href="#"><u>ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРЕПЛЕНИЯ НИЗОВЫХ ОТКОСОВ</u></a> <a href="#"><u>ВОДОСБРОСНЫХ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН</u></a>	47-49	0
	<i>Сулейман А.</i>		